

우포늪의 영양염과 수질 영양 상태 변화

이 정 준 · 이 정 호*

(대구대학교 과학교육학부)

Changes of the Nutrients and Water Trophic States in Upo Wetland. Lee, Jung Joon and Jung Ho Lee* (Division of Science Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea)

In the four swamps of Jjokjibeol, Mokpo, Upo and Sajipo in the Upo wetland, the nitrogen nutrients, phosphorus nutrients and chl-*a* had been observed during the period from April 2005 to December 2009 on monthly basis. Based on the results, the fluctuations of trophic state in the Upo wetland were estimated. Measurements of the nitrogen nutrients such as NO₃-N, NH₃-N and T-N showed to be generally decreased in comparison with those in the present studies. Yet the T-N was still considerably higher than the general concentration level of eutrophication and algal blooming. PO₄-P and T-P showed to have reduced considerably in comparison to precedent studies. However, T-P also turned out to be dissolved over the nutrient standard. Nitrogen nutrients and phosphorus nutrients were the lowest in Jjokjibeol in the Upo wetland. The chl-*a* concentrations were the highest at summer periods in Jjokjibeol and Mokpo. However, the highest at non-summer periods in Upo and Sajipo. Among the four swamps, Upo had the highest density on average of chl-*a*, and Mokpo the lowest. Through TRIX (Trophic Index) analysis evaluating trophic state of the Upo wetland, all four swamps were estimated of poor water quality (eutrophication).

Key words : Upo wetland, trophic state, TRIX, poor water quality, eutrophication

서 론

경상남도 창녕군에 위치한 우포늪은 국내 최대 규모의 자연 습지로 1998년 3월에 람사협약에 등록되었으며(이와 박, 1998; 김, 2001), 1997년에는 생태계보전지역, 1999년에는 습지보호지역으로 선정되었다(강, 2004). 우포늪은 다양한 수생식물과 습생식물뿐 아니라, 천연기념물과 멸종위기종의 조류들이 서식하고 있어 생태적으로 매우 중요한 곳이다(환경부, 1987; Baek, 1988; 한국자연보존협회, 1989; 함과 손, 1998). 그러나 우포늪의 보호 대상 지역이 습지 주변 지역으로 한정되어 있어 유역을 통한 비점오염원의 유입 시 수질 관리가 매우 어려운 실정이다

(서, 2006). 국외에서는 이미 수생태계내의 수질변화와 영양염류의 이동, 이온 물질의 농도 변화에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Linkens *et al.*, 1977; Pringle *et al.*, 1988; S.H.G.N., 1990; Meybeck *et al.*, 1992). 특히, 미국에서는 오래전부터 비점오염원 관리를 위한 프로그램을 개발하여 지속적인 모니터링이 실시되고 있다(Donald, 1993).

우포늪의 경우, 유역면적에 대한 큰 표면적비로 인해 형태적으로 부영양화가 쉽게 일어날 가능성을 지니고 있으며(Fee, 1979), 더욱이 유역으로부터 상당량의 수체내로 유입되는 인과 질소는 부영양화의 진행에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Schindler and Fee, 1974; Bloesch *et al.*, 1977; OECD, 1982).

* Corresponding author: Tel: 053) 850-6994, Fax: 053) 850-6999, E-mail: jungho@daegu.ac.kr

현재 국내에서 우포늪의 수환경요인 변화에 대한 연구는 매우 부족한 실정으로, 특히 우포늪의 수질 영양 상태에 대한 연구는 전무한 실정이다. 또한 대부분의 연구가 우포늪의 4개 습지가 아닌 우포만을 대상으로 진행되어 왔다(Choi *et al.*, 1998; 김, 2001).

본 연구에서는 2005년 4월부터 2009년 12월까지 우포늪의 4개 습지를 대상으로 인과 질소 계열의 영양염과 엽록소-*a* 등 총 6개 요소에 대한 모니터링을 실시하였으며, 연도별 변화 양상을 조사하였다. 또한 Trophic Index (TRIX; Vollenweider *et al.*, 1998)를 사용하여 현재 우포늪의 명확한 수질 영양 상태를 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

본 조사는 우포늪의 4개 습지(쪽지벌, 목포, 우포, 사지포)를 대상으로 2005년 4월부터 2009년 12월까지 매월 1회씩 총 57회에 걸쳐 진행되었다(Fig. 1). 수질 분석을 위한 시료 채취는 10~30 cm의 수심에서 플라스틱 채수병을 이용하여 채수하였다. 시료는 4L 플라스틱 무균 채수병을 사용하여 아이스박스에 보관 후, 당일 실험실로 운반하여 분석하였다. 질산성질소와 암모니아성질소, 총질소, 인산염인, 총인, 엽록소-*a*의 수질 항목은 수질오염 공정시험방법(환경부, 1996) 및 Standard Methods for examination of wastewater (APHA · AWWA · WACEF, 1998)에 따라 분석하였다. 분석된 각 항목별 자료를 이용하여 엽록소-*a*의 농도 변화에 대한 영양염의 영향을 규명하기 위해 Minitab 12.0 program을 사용하여 상관분석을 실시하였다.

우포늪의 수질 영양 상태를 평가하기 위하여 Trophic

Index (TRIX; Vollenweider *et al.*, 1998)를 사용하였다. TRIX는 엽록소-*a* 농도($\mu\text{g L}^{-1}$), 용존산소(%), 용존무기질소($\mu\text{g L}^{-1}$), 총질소($\mu\text{g L}^{-1}$)의 4개 항목을 사용하여 다음과 같은 식에 의해 산정하였다.

$$\text{TRIX} = [\text{Log}(\text{Chl-}a \times \text{aD}\% \text{O} \times \text{N} \times \text{P}) + 1.5] / 1.2$$

Trophic Index (TRIX)는 4단계로 수질 영양 상태를 평가한다(Penna *et al.*, 2004).

- High water quality (2~4): 생산성과 영양 단계가 낮은 수질.
- Good water quality (4~5): 생산성과 영양 단계가 보통인 수질.
- Mediocre water quality (5~6): 생산성이 다소 높으며, 영양 단계가 높은 수질.
- Poor water quality (6~10): 생산성이 높고, 영양 단계가 매우 높은 수질.

결 과

1. 영양염의 농도 변화

1) 질산성질소

우포늪에서 질산성질소 농도는 각 습지별로 큰 차이를 나타내었다. 쪽지벌에서 평균 질산성질소 농도는 $0.59 \pm 0.45 \text{ mg L}^{-1}$ 로 우포늪의 4개 습지 중 가장 낮게 조사되었다. 사지포에서는 평균 질산성질소 농도가 $1.14 \pm 1.59 \text{ mg L}^{-1}$ 로 쪽지벌에 비해 약 2배 가까이 높은 농도를 나타내었으며, 우포늪의 4개 습지 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 목포와 우포에서는 각각 $0.81 \pm 0.69 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $1.02 \pm 1.17 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났다. 연도별 평균 질산성질소 농도는 4개 습지에서 모두 2006년에 가장 높게 조사되었다. 특히 사지포에서는 2006년 평균 질산성질소 농도가 $2.34 \pm 2.56 \text{ mg L}^{-1}$ 로 상당히 높게 나타났다. 조사 기간 동안 하계와 비하계 기간 동안의 질산성질소 농도를 비교한 결과, 쪽지벌과 목포에서는 하계에 높은 농도를 나타낸 반면, 우포와 사지포에서는 비하계에 높은 농도를 나타내었다(Fig. 2, Tables 1, 2).

우포늪의 4개 습지 대상의 질산성질소 조사 결과, 평균 농도는 사지포에서 $1.14 \pm 1.59 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높았고, 쪽지벌에서 $0.59 \pm 0.45 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 낮게 나타났다. 하계와 비하계 기간 동안의 평균 농도는 쪽지벌과 목포에서는 하계에 높은 농도를, 우포와 사지포에서는 비하계에 높은 농도를 나타내어 습지 간에 상반된 결과를 보여주었다.

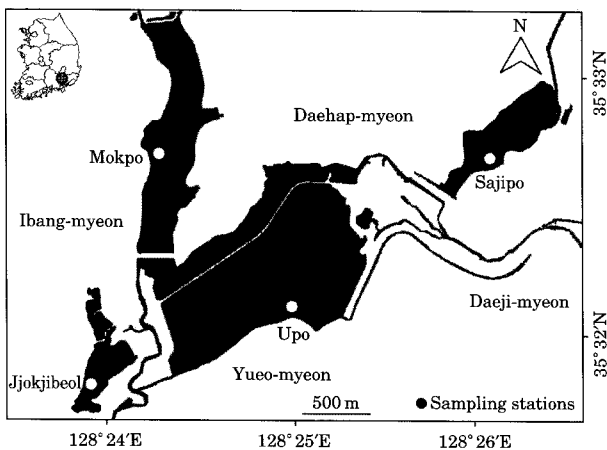


Fig. 1. A map showing the sampling station in Upo wetland.

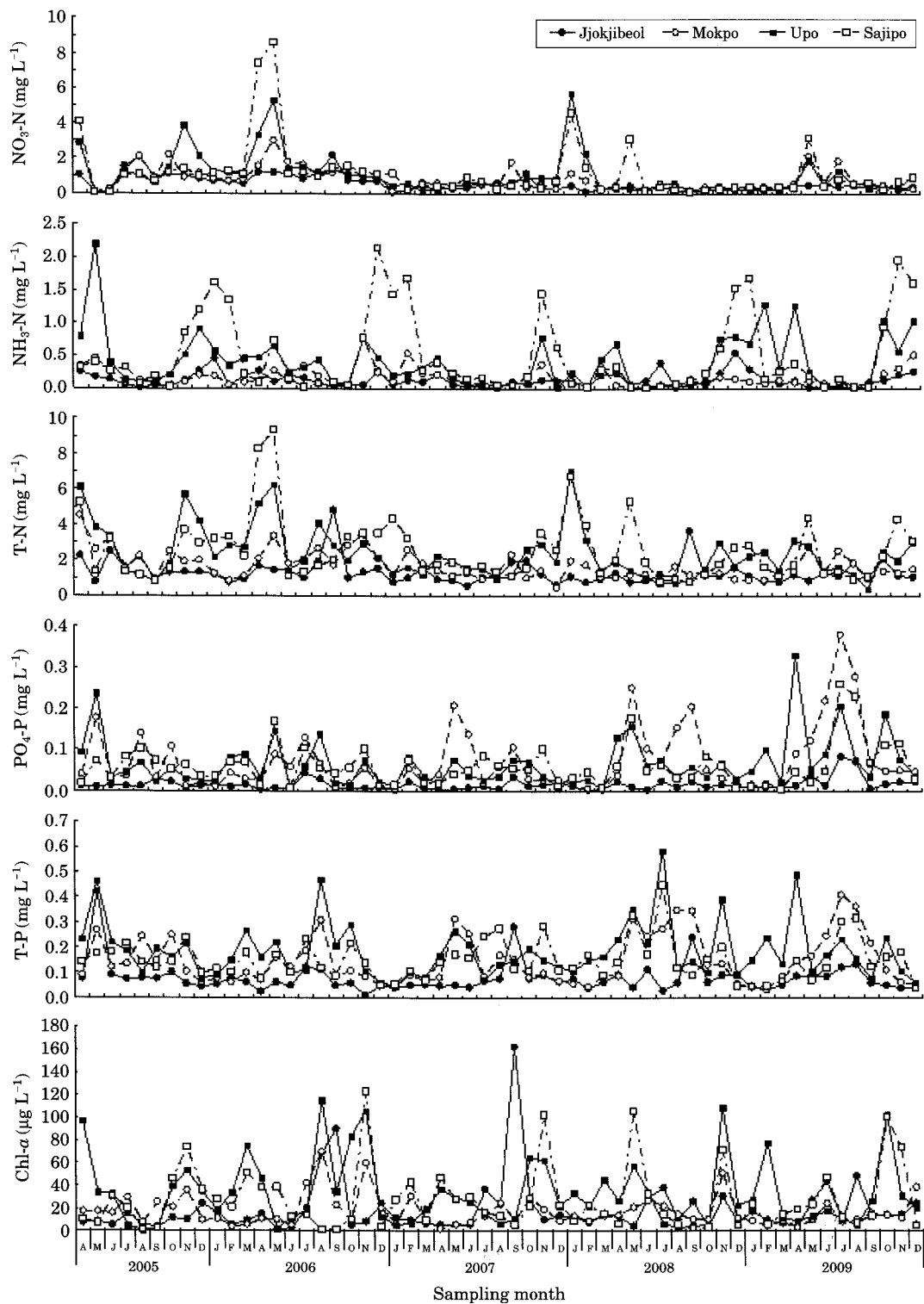


Fig. 2. The fluctuations of nitrogen, phosphorus nutrients and chlorophyll-a in the Upo wetland.

2) 암모니아성질소

우포늪의 4개 습지에서 암모니아성질소의 평균 농도는 쪽지벌과 목포에서 각각 $0.54 \pm 0.01 \text{ mg L}^{-1}$ 와 0.76 ± 0.00

mg L^{-1} 로 나타났다. 그러나 우포와 사지포에서의 평균 농도는 각각 $2.20 \pm 0.01 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $2.15 \pm 0.02 \text{ mg L}^{-1}$ 로 쪽지벌과 목포에 비해 상당히 높게 조사되었다. 연간 평

Table 1. The average of environmental factors during the summer and non-summer periods in Upo wetland from 2005 to 2009.

Factors	Sampling periods	Sampling site			
		Jokjibeol	Mokpo	Upo	Sajipo
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	0.86±0.58	0.98±0.60	0.75±0.45	0.69±0.38
	Oct. ~ May (n=42)	0.49±0.33	0.75±0.71	1.11±1.32	1.30±1.82
	Total mean (n=57)	0.59±0.45	0.81±0.69	1.02±1.17	1.14±1.59
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	0.08±0.09	0.09±0.08	0.10±0.12	0.10±0.08
	Oct. ~ May (n=42)	0.15±0.11	0.18±0.16	0.50±0.43	0.64±0.63
	Total mean (n=57)	0.13±0.11	0.16±0.15	0.39±0.41	0.50±0.59
T-N (mg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	1.73±1.07	1.61±0.59	1.40±0.92	1.22±0.36
	Oct. ~ May (n=42)	1.17±0.43	1.69±0.85	2.69±1.45	3.01±1.83
	Total mean (n=57)	1.32±0.71	1.67±0.79	2.35±1.45	2.54±1.77
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	0.025±0.023	0.116±0.100	0.065±0.048	0.090±0.064
	Oct. ~ May (n=42)	0.011±0.007	0.057±0.061	0.067±0.065	0.050±0.040
	Total mean (n=57)	0.015±0.015	0.072±0.078	0.066±0.061	0.061±0.051
T-P (mg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	0.10±0.07	0.23±0.10	0.19±0.14	0.20±0.10
	Oct. ~ May (n=42)	0.07±0.06	0.12±0.08	0.18±0.10	0.13±0.06
	Total mean (n=57)	0.08±0.06	0.15±0.10	0.19±0.11	0.15±0.08
Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	Jun. ~ Sep. (n=15)	38.36±40.72	21.77±15.84	17.67±27.92	8.70±6.11
	Oct. ~ May (n=42)	12.70±9.13	15.81±12.34	38.59±28.98	34.43±30.25
	Total mean (n=57)	19.46±25.01	17.38±13.60	33.08±30.15	27.66±28.51

균 농도는 쪽지벌의 경우 2008년에 0.17±0.15 mg L⁻¹로 가장 높았고, 목포에서는 2006년에 0.20±0.19 mg L⁻¹로 가장 높았다. 우포와 사지포에서 연 평균 암모니아성질소 농도는 모두 0.20 mg L⁻¹를 상회하여 나타났으며, 우포에서는 2005년에 0.60±0.63 mg L⁻¹, 사지포에서는 2009년에 0.61±0.70 mg L⁻¹로 각각 최대치를 나타내었다. 하계와 비하계 기간 동안 암모니아성질소의 평균 농도를 살펴본 결과 4개 습지 모두에서 비하계 동안 높은 농도가 유지되는 것으로 나타났다. 쪽지벌과 목포에서는 하계와 비하계 기간 동안 평균 암모니아성질소 농도 차이가 2배 정도에 불과하였으나, 우포와 사지포에서는 5배 이상의 차이를 보여 계절에 따른 농도 차이가 크게 나타나는 것으로 조사되었다(Fig. 2, Tables 1, 2).

우포늪의 4개 습지를 대상으로한 암모니아성질소 변화 조사에서 평균 농도는 우포에서 2.20±0.01 mg L⁻¹로 가장 높았고, 쪽지벌에서 0.54±0.01 mg L⁻¹로 가장 낮게 나타났다. 하계와 비하계 기간 동안의 평균 농도를 살펴본 결과, 4개 습지 모두에서 하계에 낮고, 비하계 기간 동안에 높은 농도를 나타내어, 질산성질소와는 다소 차이를 나타내었다.

3) 총질소

조사 기간 동안 총질소의 평균 농도는 사지포에서 2.54±1.77 mg L⁻¹로 가장 높았고, 쪽지벌에서 1.32±0.71 mg

L⁻¹로 가장 낮았다. 목포와 우포에서는 각각 1.67±0.79 mg L⁻¹와 2.35±1.45 mg L⁻¹로 조사되었다. 각 습지에서 연도별 평균 총질소 농도를 살펴보면, 목포와 우포에서는 2005년에 각각 2.36±0.97 mg L⁻¹와 3.16 mg L⁻¹로 1.87 mg L⁻¹로 가장 높았고, 쪽지벌과 사지포에서는 2006년에 각각 1.56±1.03 mg L⁻¹와 3.57±2.50 mg L⁻¹로 가장 높게 나타났다. 또한 모든 습지에서 2006년 이후 연 평균 농도가 상당히 감소하는 경향을 나타내었다. 하계와 비하계 기간 동안 총질소의 평균 농도는 쪽지벌의 경우, 하계 동안 다소 높은 농도를 나타내었으며, 목포에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 우포와 사지포에서는 하계에 비해 비하계 기간 동안 총질소 농도가 상당히 높은 것으로 확인되었다(Fig. 2, Tables 1, 2).

조사 지점별 총질소의 평균 농도는 쪽지벌과 목포에 비해 우포와 사지포에서 높은 농도를 나타내어 질산성질소, 암모니아성질소와 동일한 경향을 보여주었다.

4) 인산염인

인산염인의 조사 기간 평균 농도는 목포에서 0.072±0.078 mg L⁻¹로 가장 높았고, 쪽지벌에서 0.015±0.015 mg L⁻¹로 가장 낮았다. 우포와 사지포의 평균 인산염인 농도는 각각 0.066±0.061 mg L⁻¹와 0.061±0.051 mg L⁻¹로 유사하게 나타났다. 연도별 평균 인산염인 농도는 모든 습지에서 2005년부터 2008년까지 대체로 유사하였으

Table 2. An annual average of environmental factors in Upo wetland.

Factors	Year	Sampling site			
		Jjokjibeol	Mokpo	Upo	Sajipo
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	2005	0.94±0.59	1.28±0.87	1.48±1.20	1.17±1.12
	2006	0.97±0.43	1.32±0.62	1.71±1.25	2.34±2.56
	2007	0.42±0.27	0.52±0.42	0.55±0.24	0.54±0.57
	2008	0.31±0.13	0.41±0.27	0.87±1.57	0.95±1.38
	2009	0.39±0.10	0.66±0.59	0.57±0.50	0.72±0.76
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	2005	0.12±0.09	0.18±0.13	0.60±0.63	0.40±0.36
	2006	0.16±0.12	0.20±0.19	0.41±0.20	0.61±0.70
	2007	0.08±0.05	0.16±0.15	0.21±0.21	0.56±0.58
	2008	0.17±0.15	0.10±0.08	0.27±0.30	0.28±0.41
	2009	0.11±0.09	0.14±0.13	0.54±0.49	0.61±0.70
T-N (mg L ⁻¹)	2005	1.55±0.57	2.36±0.97	3.16±1.87	2.37±1.40
	2006	1.56±1.03	2.08±0.82	3.05±1.37	3.57±2.50
	2007	1.11±0.44	1.37±0.56	1.74±0.58	2.15±0.98
	2008	1.26±0.75	1.26±0.32	2.02±1.69	2.44±1.85
	2009	1.16±0.39	1.45±0.58	1.99±0.80	2.14±1.17
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	2005	0.014±0.007	0.065±0.056	0.067±0.064	0.059±0.026
	2006	0.012±0.012	0.045±0.035	0.059±0.046	0.062±0.045
	2007	0.011±0.009	0.060±0.058	0.042±0.025	0.048±0.028
	2008	0.012±0.007	0.079±0.079	0.058±0.043	0.054±0.043
	2009	0.025±0.025	0.111±0.113	0.105±0.087	0.079±0.082
T-P (mg L ⁻¹)	2005	0.11±0.11	0.16±0.07	0.21±0.10	0.16±0.04
	2006	0.06±0.03	0.12±0.07	0.19±0.11	0.13±0.05
	2007	0.08±0.06	0.12±0.08	0.14±0.06	0.15±0.07
	2008	0.08±0.05	0.18±0.12	0.22±0.14	0.17±0.11
	2009	0.07±0.03	0.16±0.12	0.18±0.11	0.13±0.09
Chl- <i>a</i> (µg L ⁻¹)	2005	10.08±6.00	19.89±8.42	33.05±28.58	25.16±22.76
	2006	22.27±27.00	22.52±21.60	46.78±37.35	28.57±32.46
	2007	26.46±42.17	13.90±9.31	25.42±19.52	30.70±24.71
	2008	16.53±11.09	18.07±11.22	30.77±28.88	24.50±30.78
	2009	19.59±13.50	13.14±9.22	29.40±28.79	28.74±28.87

나, 2009년에 급증하는 것으로 조사되었다. 특히 목포와 우포에서 2009년 평균 인산염인 농도는 각각 $0.111 \pm 0.113 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $0.105 \pm 0.087 \text{ mg L}^{-1}$ 로 0.1 mg L^{-1} 를 초과하여 높게 나타났다. 하계와 비하계 기간 동안 평균 인산염인 농도는 우포의 경우, 거의 동일하게 나타났다. 그러나 쪽지벌과 목포, 사지포에서는 하계에 평균 인산염인 농도가 높게 나타났다 (Fig. 2, Tables 1, 2).

우포늪의 4개 습지에서 인산염인 농도를 살펴본 결과, 쪽지벌을 제외한 목포와 우포, 사지포에서 유사한 것으로 확인되었다.

5) 총인

조사 기간 평균 총인 농도는 쪽지벌에서 $0.08 \pm 0.06 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 낮았고, 우포에서 $0.019 \pm 0.011 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 목포와 사지포에서는 각각 $0.15 \pm 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $0.15 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ 로 유사하게 나타났다. 연도별

평균 총인 농도는 쪽지벌의 경우, 2005년에 가장 높았으나, 목포와 우포, 사지포에서는 2008년에 가장 높게 나타났다. 하계와 비하계 기간 동안의 평균 총인 농도는 4개 습지에서 하계에 높은 농도를 나타내었으나, 우포에서는 큰 차이를 보이지 않았다 (Fig. 2, Tables 1, 2).

총인의 농도 변화를 살펴본 결과, 인산염인 농도와는 다소 차이를 보였다. 인산염인의 경우 연 평균 농도가 2009년에 급증하였으나, 총인 농도는 연도별로 거의 차이가 나타나지 않았다. 또한 4개 습지 중 인산염인 농도는 목포에서 $0.072 \pm 0.078 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높았으나, 총인 농도는 우포에서 $0.019 \pm 0.011 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높은 것으로 확인되었다.

2. 엽록소-*a* 농도 변화 및 영양염과의 상관성

엽록소-*a*의 조사 기간 평균 농도는 우포에서 $33.08 \pm$

30.15 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 목포에서 $17.38 \pm 13.60 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 쪽지벌에서의 평균 엽록소-a 농도는 $19.46 \pm 25.01 \mu\text{g L}^{-1}$ 였으며, 사지포에서는 $27.66 \pm 28.51 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사되었다. 연도별 평균 엽록소-a 농도는 목포와 우포의 경우, 2006년에 가장 높았고, 쪽지벌과 사지포에서는 2007년에 가장 높게 나타났다. 하계와 비하계 기간 동안 평균 엽록소-a 농도를 살펴본 결과, 쪽지벌과 목포에서는 하계 동안 상당히 높게 나타났으나, 우포와 사지포에서는 비하계 기간 동안 상당히 높은 것으로 조사되었다(Fig. 2, Tables 1, 2).

우포늪의 4개 습지에서 엽록소-a 농도를 조사한 결과, 쪽지벌과 목포에 비해 우포와 사지포에서 대체로 높은 농도를 나타내었으며, 하계와 비하계 기간 동안에도 상반되는 결과를 보여주었다.

수중 생태계의 1차 생산자인 식물플랑크톤의 생물량을 대변할 수 있는 엽록소-a 농도와 인, 질소 계열 영양염과의 상관성은 쪽지벌에서는 하계에 총인과 상관계수 0.555

로 양의 상관성을 나타내었으나, 비하계 기간 동안에는 상관성을 나타내는 요인이 없었다. 전 조사 기간 동안 상관성을 조사한 결과 인산염인과 총인만이 양의 상관성을 나타내었다. 따라서 쪽지벌에서는 인계열의 영양염이 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 목포에서는 암모니아성질소만이 하계와 비하계를 통틀어 전 조사 기간 동안 식물플랑크톤의 성장과 양의 상관성을 나타내었다. 우포에서는 하계에 암모니아성질소와 총질소가 각각 상관계수 0.756과 0.850의 매우 높은 양의 상관성을 나타내었으나, 비하계 기간 동안에는 총인만이 양의 상관성을 나타내었다. 사지포에서는 총인이 계절에 관계없이 식물플랑크톤의 성장에 지속적인 영향을 미치는 요인으로 밝혀졌으며, 비하계 기간 동안에는 총질소 또한 양의 상관성을 나타내었다(Table 3).

우포늪의 4개 습지를 대상으로 엽록소-a와 인, 질소 계열 영양염과의 상관성을 분석한 결과 각 습지별, 계절별로 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 요인이 다소 차

Table 3. The relationships between the chl-a and environmental factors in the Upo wetland.

[Jjokjibeol]

Sampling periods	Environmental factors					
	NO ₃ -N	NH ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	TRIX
Summer periods	0.065	0.116	0.399	0.036	0.555*	0.736**
Non-summer periods	0.040	0.093	0.303	0.033	0.027	0.573**
All periods	0.210	-0.061	0.259	0.423**	0.371**	0.630**

[Mokpo]

Sampling periods	Environmental factors					
	NO ₃ -N	NH ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	TRIX
Summer periods	0.018	0.577*	0.270	-0.386	-0.097	0.528*
Non-summer periods	-0.086	0.548**	0.054	0.526	0.081	0.370*
All periods	-0.027	0.436**	-0.060	0.238	0.111	0.419**

[Upo]

Sampling periods	Environmental factors					
	NO ₃ -N	NH ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	TRIX
Summer periods	0.362	0.756**	0.850**	0.329	0.457	0.785**
Non-summer periods	-0.019	0.225	0.112	0.211	0.366*	0.598**
All periods	0.059	0.347**	0.152	0.401**	0.356**	0.457**

[Sajipol]

Sampling periods	Environmental factors					
	NO ₃ -N	NH ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	TRIX
Summer periods	-0.060	0.240	0.063	0.192	0.619*	0.913**
Non-summer periods	0.022	0.117	0.654**	0.165	0.609**	0.640**
All periods	0.086	0.259	0.284*	0.312*	0.283*	0.584**

*Significant at $\alpha=0.05$; **Significant at $\alpha=0.01$

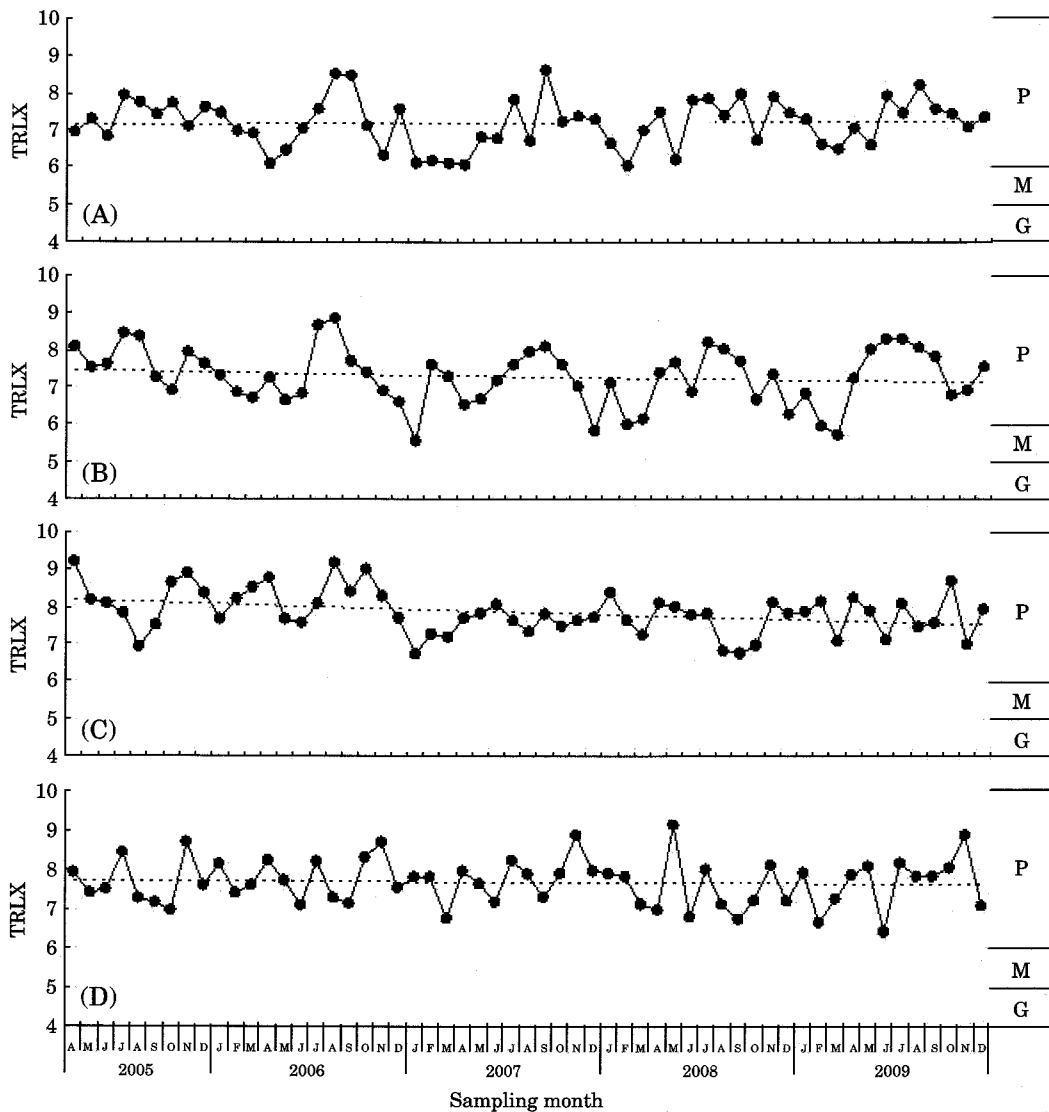


Fig. 3. The fluctuations of TRIX in the Upo wetland (A, Jjokjibeol; B, Mokpo; C, Upo; D, Sajipo) (···, trend line).

이를 나타내는 것으로 확인되었다.

3. 수질 영양 상태 변화

쪽지벌의 수질 영양 상태를 분석한 결과 전 조사 기간 평균 TRIX 값은 7.20 ± 0.65 로 poor water quality 상태로 나타났으나, 우포늪의 4개 습지 중 가장 낮을 것으로 확인되었다. 연 평균 TRIX 값은 2007년에 6.94 ± 0.37 로 가장 낮았고, 2005년에 7.41 ± 0.37 로 가장 높았다. 또한 2005년부터 2007년까지는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었으나, 2007년 이후 2009년까지 증가하는 양상을 나타내었다. 2005년부터 2009년까지의 추세 분석에서는 큰 증감 폭이 없이 일정한 양상을 보였다. 하계와 비하계 기간 동안 TRIX 값을 조사한 결과 하계에 7.83 ± 0.49 ,

비하계에 6.97 ± 0.54 로 하계에 수질 영양 단계가 더 높게 분석되었다(Fig. 3, Tables 4, 5).

목포에서의 평균 TRIX 값은 7.30 ± 0.76 으로 나타났으며, 쪽지벌과 마찬가지로 2005년에 연평균 값이 가장 높았다. 2005년의 TRIX 값은 7.76 ± 0.48 이었다. 목포에서 연 평균 TRIX 값이 가장 낮게 나타난 시기는 2007년으로 7.09 ± 0.77 이었다. 연평균 변화 양상은 2007년을 기준으로 감소 후 증가하는 양상을 보여 쪽지벌과 동일한 결과를 나타내었다. 하계와 비하계 기간 동안에도 하계에 8.09 ± 0.41 로 비하계의 7.02 ± 0.65 보다 다소 높게 나타났다(Fig. 3, Tables 4, 5).

우포에서의 평균 TRIX 값은 7.87 ± 0.59 로 4개 습지 중 가장 높게 나타났다. 연 평균 TRIX 값 또한 2005년과

Table 4. The average of TRIX during the summer and non-summer periods in Upo wetland from 2005 and 2009.

Sampling periods	Sampling site			
	Jjokjibeol	Mokpo	Upo	Sajipo
Jun. ~ Sep. (n=15)	7.83±0.49	8.09±0.41	7.70±0.61	7.66±0.51
Oct. ~ May (n=42)	6.97±0.54	7.02±0.65	7.93±0.57	7.71±0.63
Total mean (n=57)	7.20±0.65	7.30±0.76	7.87±0.59	7.70±0.60

Table 5. An annual average of TRIX in Upo wetland.

Year	Sampling site			
	Jjokjibeol	Mokpo	Upo	Sajipo
2005	7.41±0.37	7.76±0.48	8.20±0.67	7.68±0.55
2006	7.22±0.73	7.32±0.73	8.27±0.53	7.80±0.50
2007	6.94±0.76	7.09±0.77	7.55±0.34	7.70±0.52
2008	7.22±0.65	7.13±0.70	7.64±0.53	7.53±0.68
2009	7.27±0.51	7.31±0.84	7.77±0.50	7.68±0.67

2006년에 8.0을 초과하여 나타났다. 특히 2006년에는 8.27±0.53으로 우포늪의 4개 습지 중 연 평균값이 가장 높게 조사되었다. 연 평균 TRIX 값이 가장 낮았던 시기는 2007년으로 7.55±0.53이었다. 하계와 비하계 기간 동안에 평균 TRIX 값은 각각 7.70±0.61과 7.93±0.57로 유사하게 나타났다(Fig. 3, Tables 4, 5).

사지포에서 평균 TRIX 값은 7.70±0.60으로 나타났으며, 연 평균 값은 2006년에 7.80±0.50으로 가장 높았고, 2008년에 7.53±0.68로 가장 낮았다. 하계와 비하계의 평균 TRIX 값은 각각 7.66±0.51과 7.71±0.63으로 4개 습지 중 차이가 가장 적게 나타났다(Fig. 3, Tables 4, 5).

우포늪의 4개 습지를 대상으로 수질 영양 상태를 분석한 결과, 모든 습지가 poor water quality로 판명되었다. 그러나 추세 분석을 통해 변화 양상을 살펴본 결과 우포와 목포에서 차츰 감소하는 것으로 조사되었다.

고 찰

우포늪의 4개 습지를 대상으로 질산성질소와 암모니아성질소, 총질소 등 질소 계열 영양염의 농도 변화를 조사한 결과 낙동강 범람 시 영향을 가장 많이 받는 쪽지벌에서 가장 낮았으며, 사지포에서 가장 높게 나타났다. 이는 토평천과 대합천 등 우포늪으로 유입되는 상류 하천의 영향으로 보여지며, 따라서 향후 사지포로 유입되는 상류 하천의 수질 개선을 위한 연구와 조치들이 신속히 진행되어야 할 것으로 사료된다. 본 조사에서 나타난 총질소 농도는 4개 습지 모두에서 수화 발생 기준인 0.30 mg L⁻¹와 부영양 기준인 0.50 mg L⁻¹ (Klapper, 1991)를 크게 초

과하여 용존되어있는 것으로 확인되었다. Choi *et al.* (1998)의 연구에서는 우포를 대상으로 1995년부터 1998년까지 분석한 결과 질산성질소와 암모니아성질소의 평균 농도는 각각 2.20 mg L⁻¹와 0.80 mg L⁻¹로 보고하였다. 본 조사를 통해 나타난 우포늪 4개 습지에서의 질소 계열 영양염의 농도는 선행 연구 보고에 비해 상당히 낮은 것으로 확인되었다. 질소 계열 영양염 중 질산성질소와 암모니아성질소는 수중생태계의 조류와 박테리아, 곰팡이 등에게 가장 잘 이용되는 형태이며, 특히 암모니아성질소는 하계 남조류 수화현상의 원인종인 *Microcystis* 속의 대발생과 밀접한 관련을 지니고 있는 것으로 알려져 있어, 본 항목의 모니터링은 매우 중요하게 여겨지고 있다(Horne and Goldman, 1994).

질소와 함께 수계 내에서 식물플랑크톤의 성장에 중요한 제한 요인으로 작용하는 인 계열의 영양염 농도 변화를 조사하였다(Horne and Goldman, 1994). 특히 식물플랑크톤의 증식에 결정적인 관건으로 작용하는 인산염인의 경우, 질소 계열 영양염과 마찬가지로 쪽지벌에서 가장 낮게 나타나 낙동강 본류에 의한 영향보다 상류 유입 하천에 의한 영향이 많은 것으로 조사되었다. 1995년부터 1998년까지 우포늪의 4개 습지 중 우포만을 대상으로 진행된 선행 연구에서 보고된 평균 인산염인의 농도는 0.640 mg L⁻¹로 본 조사 결과의 0.066 mg L⁻¹와 비교할 때, 지난 10여 년간 우포늪에서 인산염인이 상당히 저감된 것으로 확인되었다. 그러나 쪽지벌을 제외한 목포와, 우포, 사지포에서 평균 총인 농도가 부영양기준인 0.15 mg L⁻¹를 초과하여 나타나(Klapper, 1991), 향후 본 습지들을 대상으로 인 저감을 위한 조치들이 진행되어야 할 것으로 나타났다. 또한 현재 부영양기준을 초과하지 않은 쪽지벌을 대상으로 인 계열 영양염의 지속적인 모니터링이 요구되었다.

우포늪 수체내 식물플랑크톤 생물량은 엽록소-*a*를 통해 분석하였다. 2006년의 경우, 춘계 집중 강우로 인해 우포늪으로 낙동강 본류가 상당량 유입되어 하계 수생식물의 성장이 거의 일어나지 않았다. 본 기간 동안 목포와 우포에서는 남조류에 의한 수화가 발생하여 엽록소-*a* 농도가 상당히 높게 나타났다(이와 이, 2009). 선행 연구의

결과와 우포늪의 평균 엽록소-*a* 농도를 비교한 결과 전체 농도에서는 큰 차이를 보이지 않았으나, 하계와 비하계 간의 차이는 크게 나타나, 10년 전과 비교하여 계절별 엽록소-*a* 농도 변화는 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다 (Choi *et al.*, 1998). 엽록소-*a*와 인, 질소 계열 영양염과의 상관성을 분석한 결과 각 습지별, 계절별로 차이를 나타내어, 향후 우포늪의 4개 습지를 대상으로 식물플랑크톤의 대발생을 제어하기 위해서는 각 습지별로 다른 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

호수와 저수지, 습지 등과 같은 정수생태계의 부영양화를 관리하기 위해서는 현재의 영양단계를 이해하는 것이 매우 중요하다. 현재까지 이를 위해 다양한 연구들을 통해 많은 방법들이 제시되었다(이와 김, 1996; Carlson, 1977). 본 조사에서 사용된 Trophic index(TRIX; Vollenweider *et al.*, 1998)는 종합영양단계지수의 한 방법으로, 단일요인지수에 비해 각 환경 요인 사이에 있을 수 있는 모순적 불일치를 피할 수 있으며, 보다 안정적으로 영양 상태를 파악할 수 있는 장점을 지니고 있다(Yang and Dickman, 1993). 선행 연구에서 Foz de Almargem coastal lagoon을 대상으로 습지의 영양 단계를 평가한 결과 TSI(Chl)과 TSI(TP)(Carlson and Simpson, 1996)에 비해 TRIX가 더욱 안정적인 자료를 제시하는 것으로 보고되었다(Coelho *et al.*, 2007). 본 조사에서도 TRIX 분석 결과 우포늪의 4개 습지 모두가 poor water quality 상태로 나타났으나, 질소 계열과 인 계열의 영양염에 비해 연간 변이 폭은 매우 안정적으로 나타났다.

현재 우포늪의 4개 습지는 인과 질소 계열의 영양염 분석 결과에서 모두 부영양 기준을 초과하여 나타났으며, 수질 영양 단계 평가에서도 poor water quality 상태로 명명되었다. 현재 우포늪의 수질 악화는 낙동강 본류의 유입뿐 아니라 토평천과 대합천 등 상류의 유입 하천으로부터 유입되는 영양염이 상당히 기여하는 것으로 사료된다. 따라서 향후 낙동강 유입수와 우포늪 상류의 유입하천의 수질이 우포늪의 수질 영양 상태와 우포늪에 서식하고 있는 생물들에 미치는 영향에 대한 정량적이고 장기적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구를 통해 축적된 모니터링 자료는 향후 우포늪을 대상으로 진행될 연구에 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 여겨진다.

적 요

우포늪의 4개 습지를 대상으로 2005년 3월부터 2009년 12월까지 매월 영양염과 엽록소-*a* 농도를 모니터링

하였으며, 이를 토대로 수질 영양 단계를 평가하였다. 질산성질소와 암모니아성질소, 총질소 등 질소 계열 영양염은 선행 연구 결과와 비교시 감소한 것으로 나타났다. 그러나 총질소의 경우, 아직까지 수화발생 기준과 부영양 기준 농도를 상당히 초과하여 용존되어 있는 것으로 확인되었다. 인산염인과 총인 농도 또한 선행 연구와 비교시 상당히 감소한 것으로 조사되었으나, 총인은 총질소와 마찬가지로 부영양 기준을 초과하여 용존되어 있었다. 질소 계열과 인 계열 영양염은 4개 습지 중 쪽지벌에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 엽록소-*a*의 평균 농도는 우포에서 가장 높게 나타났으며, 목포에서 가장 낮게 나타났다. 쪽지벌과 목포에서는 하계에 높게 나타났고, 우포와 사지포에서는 비하계 기간 동안 높게 나타났다. TRIX 분석을 통해 우포늪의 수질 영양 상태를 평가한 결과 4개 습지 모두 생산성이 높고 영양 단계가 높은 수질을 의미하는 poor water quality 상태로 조사되었다.

인 용 문 헌

- 강병국. 2004. 우포 가는 길: 자연생태계의 보고, 그 모든 이야기. 동학사.
- 김한순. 2001. 우포늪과 목포늪의 식물플랑크톤 군집의 계절적 변동. 한국육수학회지 **34**: 90-97.
- 서동조. 2006. 위성영상의 규칙기반 분류기법을 적용한 우포늪 유역의 비점오염원 정보 추출. 서울대학교 학위논문.
- 이갑숙, 박세나. 1998. 창녕군 우포늪의 식물플랑크톤 군집 구조. 대구대학교 기초과학연구소 연구논문집 **15**: 393-408.
- 이정준, 이정호. 2009. 우포늪의 수환경요인 변화. 환경생물 **27**: 306-313.
- 이정호, 김용재. 1996. 낙동강 수계 댐호의 부착규조 및 영양단계 평가. 환경생물 **14**: 18-28.
- 한국자연보존협회. 1989. 한국의 희귀 및 위기 동식물도감.
- 함규황, 손성원. 1998. 경상남도 창녕군 우포늪과 창원군 주남저수지 일대의 조류분포. 경남대학교 기초과학연구소 논문집 **12**: 261-274.
- 환경부. 1987. 우포, 주남저수지 생태계 조사.
- 환경부. 1996. 공정시험법안. 동화기술.
- APHA, AWWA, WACEF. 1998. Standard method for the examination of water and wastewater, 20th edition. New York, APHA.
- Baek, S.Y. 1998. Ecological studies on the Upo Wetland. M.S. Thesis. Chung-Ang University.
- Bloesch, J.P., P. Stadelman and H. Buhner. 1977. Primary production and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 511-526.

- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Carlson, R.E. and J. Simpson. 1996. A coordinator's guide to Volunteer lake monitoring methods. Madison, North American Lake Management Society.
- Choi, S.H., H. Ha, Y.H. Ju, H.W. Kim and G.J. Joo. 1998. Physico-chemical characteristics of the Woopo wetland, S. Korea. *Korean Journal of Limnology* **31**: 273-281.
- Coelho, S., S. Gamito and A. Perez-Ruzafa. 2007. Trophic state of Foz de Almargem coastal lagoon (Algarve, South Portugal) based on the water quality and the phytoplankton community. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **71**: 218-231.
- Donard, W.M. 1993. Assessing nonpoint phosphorus control in the LaPlatte River Watershed. *Lake Reservoir Management* **7**: 197-207.
- Fee, E.J. 1979. A relation between lake morphometry & primary productivity & its use in interpreting whole-lake eutrophication experiment. *Limnology and Oceanography* **24**: 401-406.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. New York, McGraw-Hill Inc.
- Klapper, H. 1991. *Control of eutrophication in inland waters*. New York, Ellis Horwood.
- Linkens, G.F., F.G. Borman, R.S. Pierce, J.S. Eaton and N.M. Johnson. 1977. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. New York, Springer-Verlag.
- Meybeck, M., G. Friedrich, R. Thomas and D. Chapman. 1992. Rivers. In: *Water Quality Assessment* (Chapman, D. ed.). Chapman and Hall, London.
- OECD. 1982. *Eutrophication of Water: Monitoring, Assessment and Control*. Paris, OECD.
- Penna, N., S. Capellacci and F. Ricci. 2004. The influence of the Po River discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin* **48**: 321-326.
- Pringle, C.M., R.J. Naiman, G. Bretschko, J.R. Karr, M.W. Oswood, J.R. Webster, R.L. Welcomme and M.J. Winterbourn. 1988. Patch dynamics in lotic systems. *Journal of the North American Benthological Society* **7**: 503-524.
- Schindler, D.W. and E.J. Fee. 1974. Experimental Lakes Area: Whole lake experiments in eutrophication. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **31**: 973-983.
- S.H.G.N. 1990. *Annuaire Hydrologique de la Suisse*. Service hydrologique et geologique national, Office fed. environment. Berne, Forets et Paysages.
- Vollenweider, R.A., F. Giovanardi, G. Montanari and A. Rinaldi. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics* **9**: 329-357.
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of lake trophic status in central Ontario, Canada. *Diatom Research* **8**: 179-193.

(Manuscript received 25 August 2010,
Revision accepted 17 September 2010)